

УДК 681.5.017

МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОГІДРОДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА МОСТОВИХ ДРОСЕЛЬНИХ СХЕМАХ ІЗ ПОСТІЙНОЮ ВИТРАТОЮ

© Пістун Є. П., Крих Г., Леськів Г., 2003
Національний університет "Львівська політехніка"

Розглянуто методологію моделювання газо гідро-динамічних вимірювальних перетворювачів на базі мостових дросельних схем із постійною витратою. Наведено їх узагальнену модель та статичні характеристики перетворення.

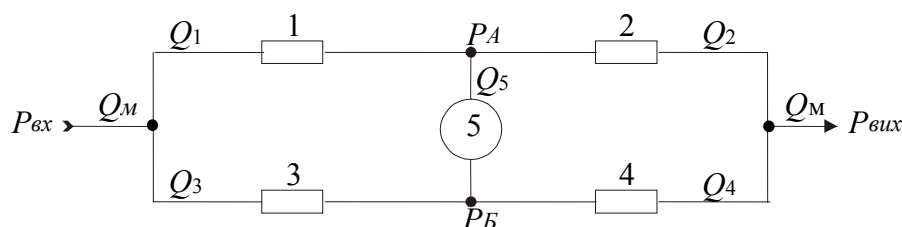
Проблеми, які пов'язані з розробкою та вдосконаленням контрольно-вимірювальної техніки і метрологічним забезпеченням, є достатньо актуальними. Одним із перспективних методів, що дозволяє вирішити деякі із вказаних проблем, є газогідродинамічний дросельний метод вимірювання [1]. Його реалізують пристрої, які побудовані з використанням газогідродинамічних ефектів, що виникають при протіканні газу чи рідини через відповідні дросельні елементи.

Задачам побудови, моделювання та проектування газогідродинамічних дросельних вимірювальних перетворювачів приділялась значна увага. Серед останніх публікацій слід відзначити [2-5], в яких розглянуто нові підходи щодо розробки, моделювання і проектування таких перетворювачів. Розроблені в цих роботах принципи вимірювання дають змогу синтезувати і математично описувати нові вимірювальні перетворювачі. Слід відзначити, що серед таких вимірювальних перетворювачів широкі функціональні можливості мають перетворювачі, які побудовані на мостових дросельних вимірювальних схемах. Однак перетворювачі, які працюють в режимі живлення – постійної витрати, ще недостатньо вивчені та досліджені.

Метою даної роботи є розробка методології

моделювання газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів на мостових дросельних вимірювальних схемах в режимі постійної витрати.

Мостова дросельна схема (рис.1) утворюється з двох подільників тиску, один з яких побудований на дроселях 1 і 2, а другий – на дроселях 3 і 4, причому ці подільники мають загальне живлення (або тиск $P_{вх}$ на вході і тиск $P_{вих}$ на виході, або загальна витрата контрольованого середовища Q_m в мостовій схемі). Мостова дросельна схема, і всі її дросельні елементи працюють на одному і тому ж контрольованому середовищі. Ця умова робить можливим перетікання середовища із міждросельної камери одного подільника в міждросельну камеру другого подільника, а отже і можливим застосовувати вторинний вимірювальний перетворювач чи вимірювальний прилад із певним вхідним гідравлічним опором. Масові витрати середовища через дроселі 1, 2, 3 і 4, які утворюють мостову схему, а також через вторинний прилад 5 позначені на рис.1 відповідно через Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 та Q_5 , а загальна масова витрата середовища через дросельний міст – через Q_m .



1, 2, 3, 4 – дроселі ; 5 – вторинний перетворювач (вимірювальний прилад)

Рис.1. Мостова дросельна вимірювальна схема

Залежно від значення вхідного гідравлічного опору R_n вторинного приладу мостова дросельна схема може працювати в трьох режимах навантаження вторинного приладу:

а) при $R_n = \infty$ через прилад 5 немає потоку середовища;

б) при $R_n = 0$ міждросельні камери подільників моста з'єднані каналом протікання, по якому вільно протікає середовище;

в) при $0 < R_n < \infty$ прилад 5 створює деякий гідравлічний опір потоку середовища в каналі перетікання.

Режим $R_n = \infty$ має місце при встановленні у вихідній діагоналі моста дифманометра, а режим $R_n = 0$ – при встановленні у вихідній діагоналі моста вимірювача витрати.

Виходячи із умови матеріального балансу масових потоків середовища в каналах вищевказаної схеми математичну модель мостової дросельної схеми можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_2 + Q_5; \\ Q_3 = Q_4 - Q_5; \\ Q_m = Q_1 + Q_3; \\ Q_1 = f_1(P_{\text{вх}}, P_A, B_n, B_{\kappa_1}, B_{e_1}); \\ Q_2 = f_2(P_A, P_{\text{вих}}, B_n, B_{\kappa_2}, B_{e_2}); \\ Q_3 = f_3(P_{\text{вх}}, P_B, B_n, B_{\kappa_3}, B_{e_3}); \\ Q_4 = f_4(P_B, P_{\text{вих}}, B_n, B_{\kappa_4}, B_{e_4}); \\ Q_5 = f_5(P_A, P_B, B_n, B_{\kappa_5}, B_{e_5}), \end{cases} \quad (1)$$

де $P_{\text{вх}}, P_{\text{вих}}$ – абсолютні тиски рідини відповідно на вході і на виході вимірювальної схеми; P_A, P_B – міждросельні тиски подільника; f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 – витратні характеристики відповідно дроселів 1, 2, 3, 4, та приладу 5, за умови, що його вхідний гідравлічний опір знаходиться в межах $0 < R_n < \infty$; B_{κ}, B_n, B_e – відповідно комплекси, що визначаються конструкцією відповідного дроселя, параметрами рідини, що протікає через дросель, та емпіричними коефіцієнтами, що враховують властивості рідини та термодинамічних процесів її протікання в дросельному елементі [2,6].

Якщо в мостовій схемі використано складені дроселі, то їх витратні характеристики згідно з [2] необхідно представити відповідними рівняннями типу f_i або системою рівнянь, аналогічною (1).

Для прикладу запишемо модель мостової вимірювальної схеми, виконаної на протилежно включених ламінарних і турбулентних дросельних елементах, у вихідній діагоналі якої встановлено

дифманометр за умови протікання через дроселі мостової схеми нестискуваної рідини:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_2; \\ Q_3 = Q_4; \\ Q_m = Q_1 + Q_3; \\ Q_1 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \alpha_1 \cdot R_1^2 \cdot [(P_{\text{вх}} - P_A) \cdot \rho]^{0.5}; \\ Q_2 = \frac{\pi \cdot R_2^4 \cdot \rho}{8 \cdot l_2 \cdot \mu} \cdot (P_A - P_{\text{вих}}); \\ Q_3 = \frac{\pi \cdot R_3^4 \cdot \rho}{8 \cdot l_3 \cdot \mu} \cdot (P_{\text{вх}} - P_B); \\ Q_4 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \alpha_4 \cdot R_4^2 \cdot [(P_B - P_{\text{вих}}) \cdot \rho]^{0.5}; \\ \Delta P = P_B - P_A, \end{cases} \quad (2)$$

де μ і ρ – динамічна в'язкість і густина середовища; R_1, R_2, R_3, R_4 – радіуси отворів дроселів 1, 2, 3, 4, відповідно; α_1 і α_4 – емпіричні коефіцієнти витрати турбулентних дроселів 1 і 4 відповідно; l_2, l_3 – довжини каналів ламінарних дроселів 2 і 3 відповідно. Інші позначення та індексація в (2) відповідають системі (1).

Розглянемо методику отримання розв'язку системи (2) за умов роботи даної дросельної схеми, коли забезпечується стабілізація загальної витрати Q_m . З метою спрощення запису введемо наступні позначення:

$$\begin{aligned} Q_6 &= Q_1 = Q_2; \quad Q_n = Q_3 = Q_4; \\ r_1 &= [\sqrt{2} \alpha_1 \cdot \pi \cdot R_1^2 \cdot \sqrt{\rho}]^{-1}; \quad r_2 = \frac{8 \cdot l_2 \cdot \mu}{\pi \cdot R_2^4 \cdot \rho}; \\ r_3 &= \frac{8 \cdot l_3 \cdot \mu}{\pi \cdot R_3^4 \cdot \rho}; \quad r_4 = [\sqrt{2} \cdot \alpha_4 \cdot \pi \cdot R_4^2 \cdot \sqrt{\rho}]^{-1}. \end{aligned}$$

Враховуючи введені позначення, система (2) набуває такого вигляду

$$\begin{cases} Q_m = Q_6 + Q_n; \\ Q_6^2 \cdot r_1^2 = P_{\text{вх}} - P_A; \\ Q_6 \cdot r_2 = P_A - P_{\text{вих}}; \\ Q_n \cdot r_3 = P_{\text{вх}} - P_B; \\ Q_n^2 \cdot r_4^2 = P_B - P_{\text{вих}}; \\ \Delta P = P_B - P_A. \end{cases} \quad (3)$$

Віднімаючи від другого рівняння системи (3) четверте рівняння, а також із п'ятого рівняння третє, знаходимо, що

$$P_B - P_A = r_1^2 \cdot Q_6^2 - r_3 \cdot Q_n, \quad (4)$$

$$P_B - P_A = r_4^2 \cdot Q_n^2 - r_2 \cdot Q_6. \quad (5)$$

Отримані рівняння (4) і (5) із врахуванням першого і шостого рівнянь системи (3) можна

представити у вигляді квадратних рівнянь таким чином:

$$r_1^2 \cdot Q_6^2 + r_3 \cdot Q_6 - r_3 \cdot Q_m - \Delta P = 0,$$

$$r_4^2 \cdot Q_n^2 + r_2 \cdot Q_n - r_2 \cdot Q_m - \Delta P = 0,$$

з яких визначають витрати Q_6 і Q_n

$$Q_6 = (\sqrt{r_3^2 + 4 \cdot r_1^2 \cdot r_3 \cdot Q_m + 4 \cdot r_1^2 \cdot \Delta P} - r_3) / (2 \cdot r_1^2), \quad (6)$$

$$Q_n = (\sqrt{r_2^2 + 4 \cdot r_4^2 \cdot r_2 \cdot Q_m + 4 \cdot r_4^2 \cdot \Delta P} - r_2) / (2 \cdot r_4^2). \quad (7)$$

Виконавши підстановку (6) і (7) в перше рівняння системи (3), запишемо, що

$$2r_1^2 \cdot r_4^2 \cdot Q_m = r_4^2 \cdot \sqrt{r_3^2 + 4r_1^2 \cdot r_3 \cdot Q_m + 4r_1^2 \cdot \Delta P} - r_3 \cdot r_4^2 - r_2 \cdot r_1^2 + r_1^2 \sqrt{r_2^2 + 4 \cdot r_4^2 \cdot r_2 \cdot Q_m + 4r_4^2 \cdot \Delta P},$$

звідки після перетворень отримуємо кінцеве рівняння для визначення ΔP

$$(r_1^2 - r_4^2)^2 \cdot \Delta P^2 + [(2r_1^2 \cdot r_4^2 \cdot Q_m^2 + r_2 \cdot r_3) \cdot (-r_1^2 - r_4^2) - r_3^2 \cdot r_4^2 - r_1^2 \cdot r_2^2 - 4r_1^2 \cdot r_4^2 \cdot Q_m \times (r_3 + r_2)] \cdot \Delta P + (r_1^4 \cdot r_4^4 \cdot Q_m^4 - r_2 \cdot r_3^2 \cdot r_4^2 \cdot Q_m - r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot r_3 \cdot Q_m - 3r_1^2 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4^2 \cdot Q_m^2) = 0. \quad (8)$$

Таким чином, вихідний сигнал ΔP даної мостової схеми за умови стабілізації витрати Q_m можна знайти з рівняння (8) і він буде таким

$$\Delta P = P_B - P_A = \left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / (2a), \quad (9)$$

де $a = (r_1^2 - r_4^2)^2$,

$$b = (2r_1^2 \cdot r_4^2 \cdot Q_m^2 + r_2 \cdot r_3) \cdot (-r_1^2 - r_4^2) - r_3^2 \cdot r_4^2 - r_1^2 \cdot r_2^2 - 4 \cdot r_1^2 \cdot r_4^2 \cdot Q_m \cdot (r_3 + r_2),$$

$$c = r_1^4 \cdot r_4^4 \cdot Q_m^4 - r_2 \cdot r_3^2 \cdot r_4^2 \cdot Q_m - r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot r_3 \cdot Q_m - 3 \cdot r_1^2 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4^2 \cdot Q_m^2.$$

Якщо в мостовій схемі використати однакові ламінарні дроселі і однакові турбулентні дроселі, тобто $r_1 = r_4 = r_T$ і $r_2 = r_3 = r_L$, то вираз (9) суттєво спрощується, оскільки коефіцієнт a в (8) і (9) дорівнює нулю. У цьому випадку вихідний сигнал ΔP можна знайти безпосередньо з (8)

$$\Delta P = -\frac{c}{b} = \frac{r_T^6 \cdot Q_m^4 - 2r_L^3 \cdot Q_m - 3r_T^2 \cdot r_L^2 \cdot Q_m^2}{4r_T^4 \cdot Q_m^2 + 8r_T^2 \cdot r_L \cdot Q_m + 4 \cdot r_L^2}, \quad (10)$$

звідки, після відповідних перетворень, маємо, що

$$\Delta P = \frac{Q_m}{2} \cdot \left(\frac{Q_m \cdot r_T^2}{2} - r_L \right) = \frac{Q_m^2}{8\alpha^2 \cdot \pi^2 \cdot R_T^2 \cdot \rho} - \frac{4l \cdot \mu \cdot Q_m}{\pi \cdot R_L^4 \cdot \rho}, \quad (11)$$

де $R_T = R_1 = R_4$, $R_L = R_2 = R_3$, $l = l_2 = l_3$, $\alpha = \alpha_1 = \alpha_4$.

Слід зазначити, що вказані однакові параметри дросельних елементів забезпечують рівність витрат $Q_6 = Q_n = Q_m/2$.

Аналогічні (9) вирази можна отримати і для вимірювальних перетворювачів, що працюють в інших режимах навантаження вторинного приладу.

Мостові дросельні вимірювальні схеми з іншими типами дросельних елементів описуються подібними системами рівнянь (1), (2). Однак не для всіх таких схем (залежно від умов роботи мостової схеми) можна отримати аналітичні залежності, що встановлюють зв'язок вихідного сигналу з інформативними та неінформативними фізичними величинами, зокрема з параметрами середовища і дросельних елементів.

При цьому вимірювальними параметрами можуть бути густина чи в'язкість вимірюваного середовища, його склад, конструктивні характеристики дросельних елементів тощо.

1. Залманзон Л. А. *Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем.* – М.: Изд-во “Наука”, 1973. – 464с. 2. Пістун Є.П., Леськів Г.Ф. Газогідродинамічні вимірювальні перетворювачі на складених дросельних елементах. // *Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”.* – 2002. - №460. - С. 81-88. 3. Пістун Є.П., Леськів Г.Ф. Математичний опис структур побудови схем вимірювальних перетворювачів // *Вимірювальна техніка та метрологія. Міжвідомчий науково-технічний збірник Національного університету “Львівська політехніка”.* – 2002. - Вип.61. - С. 87-92. 4. Пістун Є.П., Леськів Г.Ф. Побудова та моделювання газогідродинамічних вимірювальних схем на двох дросельних елементах // *Методи та прилади контролю якості.* – 2002. - №9. - С. 35-38. 5. Пістун Є.П., Крих Г.Б. Принципи побудови гідродинамічних вимірювальних перетворювачів на базі дросельних матриць // *Методи та прилади контролю якості.* – 2000. - № 5. - С. 56-59. 6. Пістун Е.П., Теплюх З.Н., Стасюк И.Д. Расходные характеристики газодинамических дросельных элементов. – В кн.: *Пневматические и гидравлические устройства и системы управления. X Международная конференция “Яблонна”.* – М.: Энергоатомиздат, 1986. - С. 31-34.